

欧亚遥相关与中国北方冬季雾霾的关系

李 焯*, 虞 洋, 李洪雷

中国人民解放军92020部队, 山东 青岛

收稿日期: 2023年11月24日; 录用日期: 2024年1月15日; 发布日期: 2024年1月23日

摘 要

本文利用36年气象观测资料和NCEP/NCAR再分析资料, 采用多种统计学方法, 研究分析了冬季大气环流形势与中国北方地区雾霾年际变化的关系。结果表明, 500 hPa等压面上欧亚遥相关是影响中国北方雾霾的重要形势, 新定义的欧亚遥相关指数与雾霾日数呈显著的负相关关系。欧亚遥相关处于负位相时, 东亚大槽减弱, 西风带在东亚表现为纬向环流, 西伯利亚高压减弱, 北风减弱, 使得中国北方地区雾霾日数增多。反之, 欧亚遥相关正位相时, 雾霾日数减少。欧亚遥相关具有约13~15天发展和衰退的活动周期, 在欧亚遥相关指数出现峰值前约两天, 能见度开始显著变化, 持续时间约5~6天。

关键词

雾霾, 欧亚遥相关, 中国北方

The Relationship between Eurasian Teleconnection and Haze-Fog in Northern China in Winter

Ye Li*, Yang Yu, Honglei Li

Unit No.92020 of PLA, Qingdao Shandong

Received: Nov. 24th, 2023; accepted: Jan. 15th, 2024; published: Jan. 23rd, 2024

Abstract

Using meteorological observation data and NCEP/NCAR reanalysis data, the impacts of the atmospheric circulation pattern on the interannual variability of haze-fog in northern China in winter are studied by means of statistical methods. The results show that the Eurasian teleconnection

*通讯作者。

at the 500 hPa isostatic surface is the most important pattern affecting the haze-fog frequency in northern China. There is a significant negative correlation between the newly defined Eurasian teleconnection index and the number of haze-fog days. When the Eurasian teleconnection is in a negative phase, the East Asia major trough weakens, the westerlies appear as a zonal circulation in East Asia, the Siberian high pressure and the northerly wind weakens. As a result, the occurrence of haze-fog in northern China has increased. When the Eurasian teleconnection is in the positive phase, the opposite is true. The EU pattern goes through a considerable development and decay within 13~15 days. The visibility starts to significantly change from lag -2 days of EU peak phase, and the duration is about 5~6 days.

Keywords

Haze-Fog, Eurasian Teleconnection, Northern China

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

雾霾是一种对大气中各种悬浮颗粒物含量超标的笼统表述,进入 21 世纪之后,越来越多的学者开始重视雾霾这一天气现象,中国很多地区都已经把雾霾天气现象作为灾害性天气进行预警预报。中国的雾霾存在显著的空间分布差异,整体呈现出东多西少的特征,尤其是长江中下游和华北地区[1]。中国的雾霾存在显著的空间分布差异,整体呈现出东多西少的特征。20 世纪 80 年代后,雾霾日数明显增加,其中 12 月和 1 月的霾雾天数已达到全年霾雾天数的 30%,许多严重的霾雾事件也发生在冬季[2]。此外,雾霾在冬季还呈现出了显著的年际变化[3]。

人为排放导致了北方和南方冬季雾霾的分布差异[4]。在过去几十年中,人为排放的变化主导了中国东部冬季 PM_{2.5} 浓度的增加[5]。但是,PM_{2.5} 浓度的年际变化主要是由气象条件变化导致的,而非人为排放,雾霾的强度、持续时间、输运迁移、消除等特性和过程更是与气候背景的变化密不可分。Li 等研究了东部雾霾的年际变化和东亚冬季风的关系,发现在东亚冬季风偏弱时,对流层底层西伯利亚高压和东亚大槽均有所减弱,导致近地面风和水平纬向风的垂直切变减弱,中国中东部冬季雾霾日数增多[6]。冬季北半球 500 hPa 位势高度异常对中国的天气气候有很显著的影响,例如,包括极涡、乌拉尔山高压和东亚大槽在内的天气系统可以通过影响地面气象要素影响中国雾霾的产生和消散。在对一些雾霾发生个例的研究分析中提及了 500 hPa 位势高度异常对中国的雾霾的影响。例如,周须文等通过聚类分析发现,1 月份 500 hPa 位势高度异常表现为极涡偏强时京津冀雾霾天气偏多,表现为极涡偏弱时则雾霾天气偏少[7]。赖芬芬等和赵桂香等对雾霾的分析时发现,冬季 500 hPa 等压面上极涡等大尺度环流形势与雾霾产生有密切关系[8] [9]。

研究表明,随着波列从欧亚大陆自西向东的移动,与乌拉尔阻塞相关的大气环流异常对东亚冬季气候异常的影响在加强[10]。杨双艳等发现,欧亚遥相关对北半球中高纬度脊和槽的强度有重要影响,即对东亚气候有重要影响[11]。Wallace 和 Gutzler 指出,冬季北半球 500 hPa 上存在包括欧亚遥相关在内的五种遥相关类型[12]。而欧亚遥相关位于欧亚大陆上方,是东亚气候变化的重要指标,其变化与冬季北半球大气环流的调整密切相关。例如,Sung 等发现东亚冬季冷暖事件的频率与欧亚遥相关密切相关[13]。欧亚遥相关也可能对雾霾产生重要影响。

大尺度环流系统对中国的雾霾的变化有很好的指导意义。现有研究中关于位势高度对雾霾影响的研究大多都是案例分析,而关于其年际变化对雾霾影响的研究仍存在不足[14] [15]。冬季是雾霾最频繁的季节,而华北地区是中国雾霾的多发区。因此本文将利用相关性分析、EOF分析、奇异值分解、合成分析等方法研究欧亚遥相关与中国北方地区冬季雾霾的关系。

2. 数据与方法

2.1. 站点观测数据

本文中使用的气象观测数据来自中国气象局。该资料包含了国家气象信息中心获取的中国地面站所观测的各项数据,其中包括站号、站点经纬度、气压、风速、能见度、温度、降水量、湿度和天气现象等数据。每日均有多次观测,分别为北京时的02时、08时、14时和20时。本文选取了1980~2015年1月、2月、12月的每日观测数据,其中由于数据存在缺失,2000年1~2月的数据被剔除,共计106个月。

站点选取时,若某一站点在一个月对能见度气象数据的记录少于5天,则该站点被剔除。通过质量控制,本文共选择了80个研究站点。如图1所示,这些站点均匀地覆盖了中国华北地区(110°E~125°E, 30°N~40°N),密度适当,可以代表中国北方的区域特征。本文中的霾雾标准定义为能见度小于或等于10 km,降水、灰尘和其他可能影响能见度的因素均被消除[3] [4]。

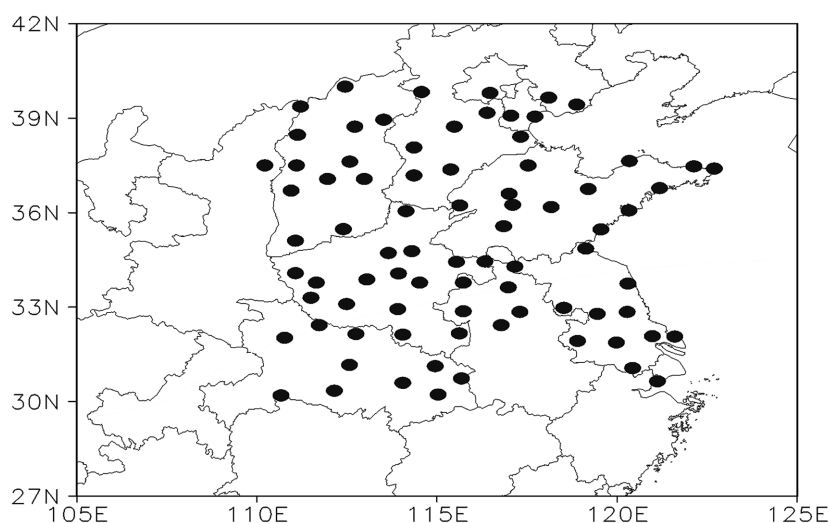


Figure 1. Locations of the selected stations

图 1. 站点分布图

2.2. 再分析数据

本文中使用的再分析数据来自美国国家环境预测中心/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)的再分析资料。再分析数据空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,时间范围为1980~2015年,时间分辨率包括月、日。

2.3. 奇异值分解

利用奇异值分解方法,可以从两个要素场中分离出若干相对应的空间分布。一般而言,异性相关系数图的数值会小于同性相关系数的数值,但异性相关系数图能反映出在已知其中一个气象要素场时,另一个要素场的可能分布情况。因此,对于揭示两个气象要素场相关关系来说,异性相关系数场能更好的展现出来。本文主要利用了异性相关分析两种空间型的关系。

3. 结果与讨论

3.1. 雾霾特征分析

对选取的 80 个站点的雾霾日数求平均, 得到 1980~2015 年中冬季雾霾日数。冬季雾霾日数除呈现明显的年际变化外, 也存在年代际变化, 趋势如图 2 中的实线所示, 雾霾日数在 1980~1990 年和 2005 年以后呈增长趋势, 在 1990~2005 年呈现缓慢的减少趋势。该趋势与污染物的排放趋势相似[16] [17]。因此, 为了减小污染物排放的影响, 我们使用三次函数对数据进行去趋势处理。本研究将使用去除趋势后的雾霾日数。

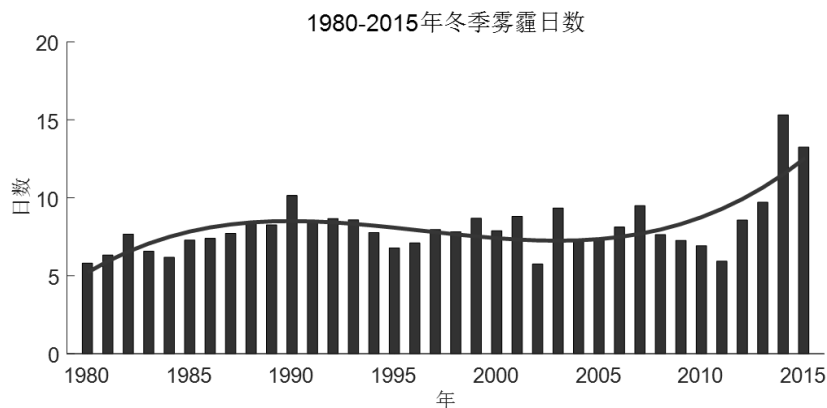


Figure 2. The number of haze-fog days in winter from 1980 to 2015 (bar, units: days) and its trend (line)

图 2. 1980~2015 年冬季雾霾日数(柱状, 单位: 天)和趋势(实线)

对 36 年冬季雾霾日数进行 EOF 分析, 其中第一模态的方差贡献率达到 44.6%。如图 3 所示, 在第一模态中华北地区所有站点雾霾日数一致增多, 排除污染物的排放的原因后, 可以认为, 中国北方地区表现出了受同类天气系统影响而产生的雾霾日数一致增加的日数变化特征。

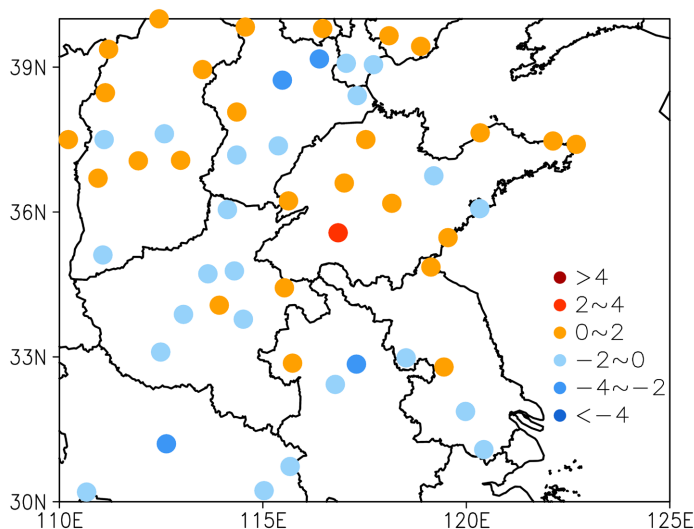


Figure 3. The spatial distribution of the first modes of EOF analysis of the number of haze-fog days during winter

图 3. 冬季雾霾日数 EOF 分析第一模态空间分布

3.2. 雾霾与欧亚遥相关的关系

3.2.1. 雾霾与欧亚遥相关主要模态

对 1980~2015 年冬季 500 hPa 位势高度场与雾霾日数进行奇异值分解, 雾霾日数场为左场, 以 500 hPa 位势高度场为右场。图 4 为奇异值分解第一模态, 贡献率 58.8%。第一模态雾霾日数的异性相关场中大部分站点显示为正值, 说明华北地区雾霾具有同时多发或少发的变化特征, 且河北和河南等地正异常更显著, 这一分布与雾霾日数的 EOF 分解的第一模态空间分布较为相似, 是华北雾霾的主要分布形势。500 hPa 位势高度的异性相关场中, 整个欧亚大陆自欧洲西部至东亚沿岸是正 - 负 - 正的相关中心, 表现为欧亚遥相关的负位相。

奇异值分解第一模态说明雾霾日数增加时, 500 hPa 位势高度在西伯利亚地区为负异常, 在欧洲和东亚沿海地区为正异常。即欧洲西北部和东亚的大槽以及乌拉尔的高压脊都削弱, 这意味着西风环流的经向分量减弱。

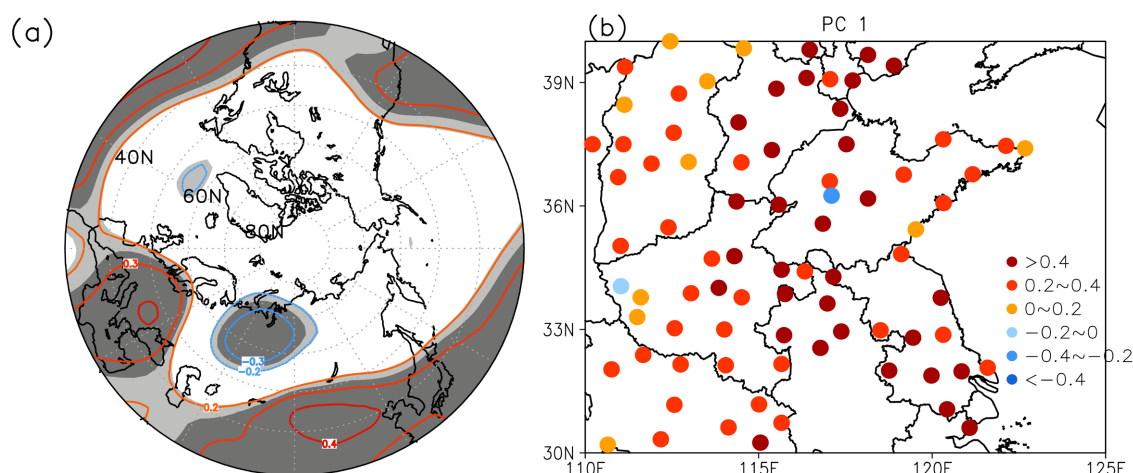


Figure 4. The heterocorrelation of the first mode of the SVD between the 500 hPa geopotential height (a) and the number of haze-fog days (b) (the shaded area denotes that the 99% confidence level is exceeded)

图 4. 500 hPa 位势高度(a)与雾霾日数(b) SVD 第一模态的异性相关场(阴影区域表示通过 99%的置信水平)

3.2.2. 雾霾日数异常年份欧亚遥相关特征

首先, 利用标准化处理的方式挑选出冬季雾霾天数较少和雾霾天数较多的年份。2014、2015 年的雾霾天数异常偏高, 这将对标准化分析产生较大的消极影响, 不利于年份的挑选, 因此我们将 2014 年和 2015 年直接挑选为冬季雾霾日数较多的年份。后对 1980~2013 年的雾霾日数进行标准化处理。雾霾日数大于一个标准差的年份定义为雾霾多发年, 它们分别是 1990 年、2003 年、2007 年和 2013 年。雾霾日数少于一个标准差的年份定义为雾霾少发年, 它们分别是 1980 年、1981 年、1983 年、1984 年、2002 年和 2011 年。

由图 5 可知, 在雾霾多发年, 极地地区位势高度正异常, 欧亚遥相关波列呈正 - 负 - 正的正位相分布, 西风环流的经向分量减弱。在雾霾少发年, 极地位势高度负异常, 欧亚遥相关波列呈负 - 正 - 负的正位相分布。

3.2.3. 雾霾与波作用通量

根据 500 hPa 位势高度场和风场资料, 计算了雾霾多发年和雾霾少发年的波作用通量。图 5 表明, 欧亚大陆上空确实存在明显的与欧亚遥相关相关的准静止行星波活动, 从欧洲地区自西向东传播。对比

两种合成可以发现,这种自欧洲传播至华北地区的波作用通量的路径和强度均存在明显差异,从位势高度正异常中心传播至位势高度负异常中心的波作用通量明显强于从位势高度负异常中心传播至位势高度正异常中心的波作用通量。

雾霾少发年,它表现为从高纬度向中低纬度的传播,在东亚中纬度地区异常辐合。此外,大气在新地岛以西的区域内为垂直上升运动,在新地岛以东至华北地区为下沉运动,表明有较强的冷空气从新地岛西北地区被抬升至高空后沿波作用通量路径输送至华北地区的对流层低层。这表明,波作用通量自上而下、自北向南影响着东亚中纬度地区的低层对流层。下沉运动使得对流层下部的西伯利亚高压增强,东亚沿岸地区气压梯度加强,对流层中部经向环流增强(图6)。同样,与高空较强的位势高度异常相对应,海平面气压也呈现出了相似分布情况(图略)。波作用通量从新地岛地区带来的较强冷空气和东亚沿岸气压梯度的加强都将导致华北地区出现较强的偏北风,导致雾霾少发年内中国北方多强烈的冷平流,有利于污染物的扩散。

相反,在雾霾多发年,西风带表现为纬向环流,波作用通量沿纬度线由西向东传播,受高纬度地区影响较小,冷空气的来源位置明显偏南,且冷空气也不易向南输送。此外,波作用通量在东亚地区垂直向上传播,削弱了对流层下部的西伯利亚高压,冷空气减弱。中纬度地区的上升运动、减弱的西伯利亚高压和较弱的冷空气导致了我国北方地区的南风异常和较低的风速,这不利于污染物的扩散。

另外,通过奇异值分解第一模态对气象要素进行回归分析,发现各要素场的回归分布与合成分析相似,可以得到相同的结论。

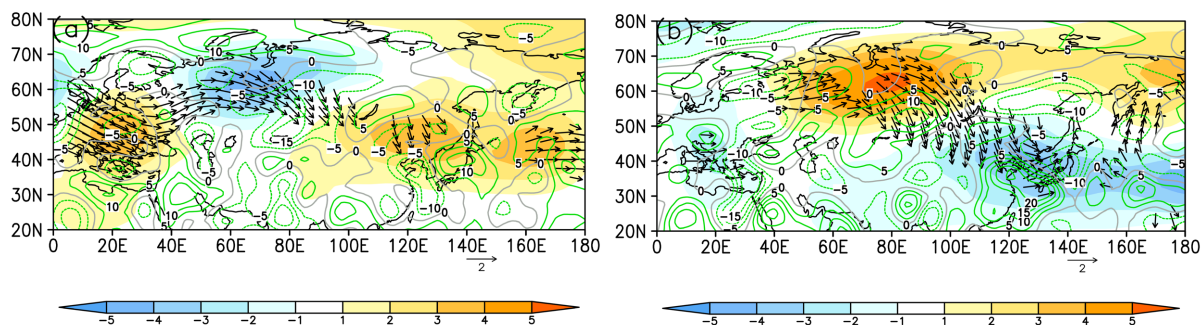


Figure 5. The 500 hPa geopotential height anomaly (shading), horizontal wave activity flux (vectors) and vertical wave activity flux (contour, 10^{-3}) of the higher haze-fog years (a) and lower haze-fog years (b)

图 5. 雾霾多发年(a)和少发年(b) 500 hPa 位势高度(填色)、水平波活动通量(箭头)和垂直速度(等值线, 10^{-3})异常合成

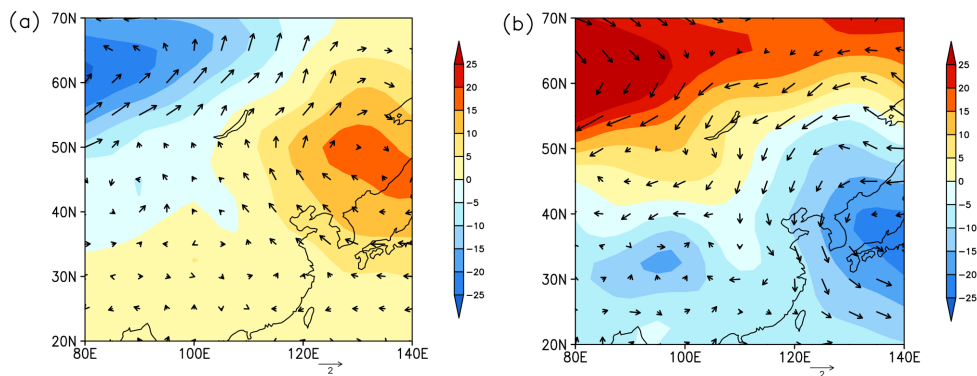


Figure 6. Compound field of geopotential height anomaly and wind (vector) at 850 hPa of the higher haze-fog years (a) and lower haze-fog years (b)

图 6. 雾霾多发年(a)和少发年(b) 850 hPa 位势高度和风场(箭头)距平场合成

3.3. 雾霾与欧亚遥相关指数的关系

3.3.1. 新欧亚遥相关指数确定

相关系数场、SVD 的第一模态以及合成分析均表现出了在欧亚大陆上空 500 hPa 位势高度场上的纬向波列。这种模式类似于由 Wallace 和 Gutzler 提出的欧亚遥相关模式, 本文根据 Wallace 和 Gutzler 对欧亚遥相关指数的定义, 定义了一个新的欧亚遥相关指数[12]。选取相关系数最大的三个格点来计算欧亚遥相关指数, 分别为(20°E, 45°N)、(70°E, 60°N)和(110°E, 40°N)。新的欧亚遥相关指数(用 I_{EU} 表示)计算公式如下:

$$I_{EU} = -1/4 \times z(20^{\circ}E, 45^{\circ}N) + 1/2 \times z(70^{\circ}E, 60^{\circ}N) - 1/4 \times z(110^{\circ}E, 40^{\circ}N)$$

其中 z 为标准化的 500 hPa 月平均位势高度异常。

I_{EU} 与雾霾日数的相关系数为-0.5, 超过了 99% 的置信水平(图 7)。表示当欧亚遥相关指数为正, 即欧亚遥相关为正位相时, 雾霾日数减少; 当欧亚遥相关指数为负, 即欧亚遥相关为负位相时, 雾霾日数增加。新定义的欧亚遥相关指数比 Wallace 和 Gutzler 提出的欧亚遥相关指数与雾霾的关系更密切[12]。其中, 选出的雾霾多发年的欧亚遥相关指数平均值为-0.7, 雾霾少发年的欧亚遥相关指数平均值为 0.8。

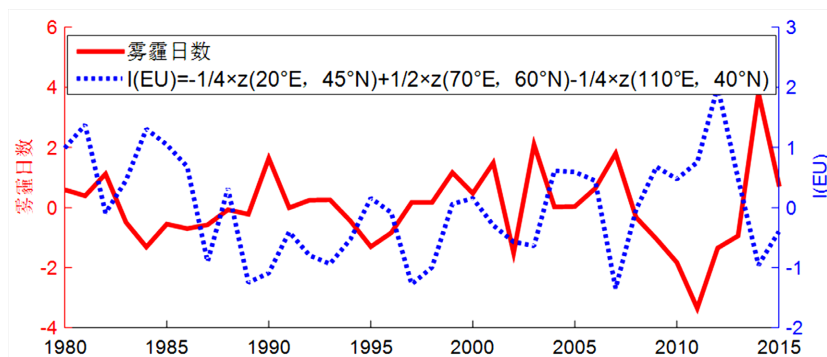


Figure 7. The detrended number of haze-fog days and the EU index
图 7. 去趋势的雾霾日数和 EU 指数

3.3.2. 欧亚遥相关的生命周期及其与能见度的关系

为了更进一步了解亚欧大陆 EU 遥相关与雾霾的关系以及对雾霾变化的影响, 使用日平均的位势高度数据及各站点的能见度数据分析了欧亚遥相关的生命周期及其对能见度的影响。逐日分析欧亚遥相关指数, 当欧亚遥相关指数为时段内极大值并超过一个标准差时, 该峰值日被定义为“lag 0”。“lag 0”之前的一天标记为“lag -1”, 之后的一天标记为“lag 1”, 依此类推。如果在 15 天内出现两个或多个峰值, 则只计算第一个峰值, 以确保每个欧亚遥相关生命周期的独立性。通过计算, 36 年内共统计有 57 个正峰值和 68 个负峰值。

分别对正、负峰值前后 10 天的遥相关指数进行合成。如图 8 所示, 在负峰值合成时段中, 欧亚遥相关指数从 lag -6 天快速下降, 在 lag 0 天达到最小值, 约为-1.2, 然后增大; 正峰值时段欧亚遥相关指数合成显示了相反的趋势, 从 lag -6 天开始增大, 在 lag 0 天达到最大值, 约为 1.2, 然后减小。正负位相的 EU 遥相关的整个周期均在 13~15 天左右。此外, 欧亚遥相关指数在 lag 0 天之前出现快速的生长或减小, 在 lag 0 天之后的变化则相对减缓。

为了分析欧亚遥相关正、负位相生命周期内的发展和衰退与雾霾的关系, 利用中国北方 80 个站的平均能见度数据合成了这两个时段的能见度(图 9)。结果表明能见度与欧亚遥相关指数呈相反的变化趋势。

在欧亚遥相关负位相周期内，能见度在 lag -2 天左右开始下降，持续至 lag 3 天后开始增加；雾霾过程大约持续 5~6 天，与统计上一次雾霾天气持续时间相符。在正位相周期内，能见度在 lag 0 天开始增加，在 lag 3 天后开始回落并稳定，且 lag 6 天时的能见度仍高于 lag -2 天。

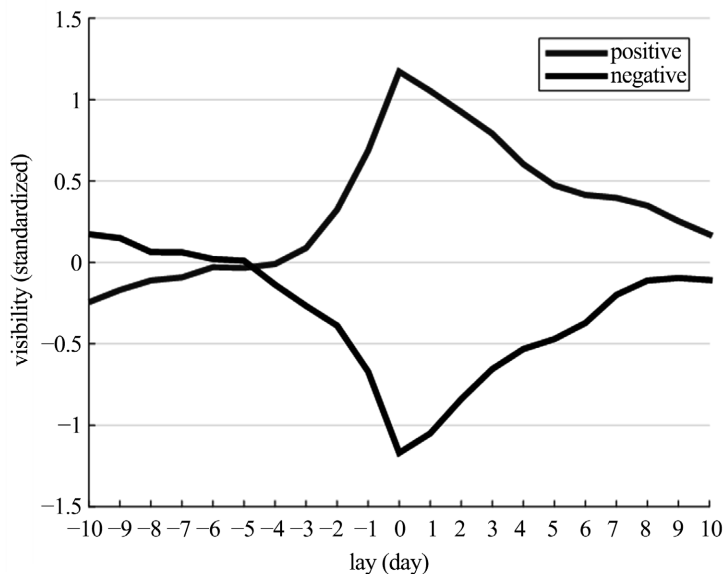


Figure 8. Composite of the EU index from lag -10 to lag 10

图 8. EU 指数峰值 lag -10 到 lag 10 天的合成

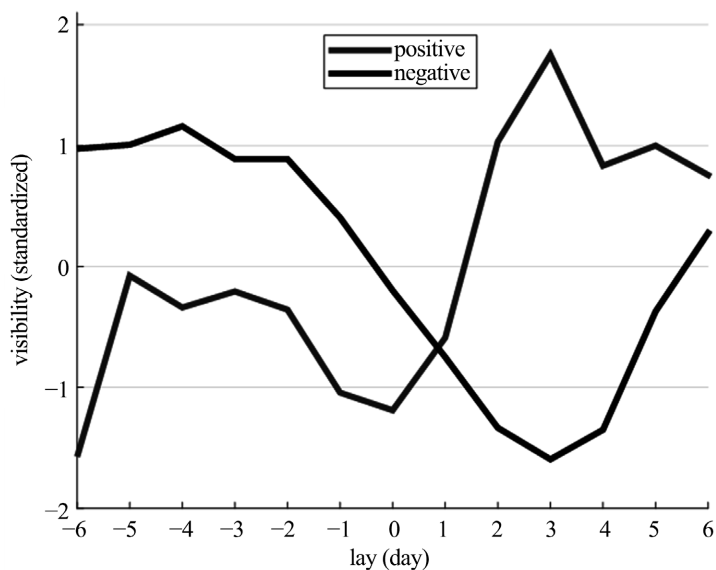


Figure 9. Average standardized visibility anomalies in North China around the peak phase of the EU pattern from lag -6 to lag 6

图 9. EU 指数峰值 lag -6 天到 lag 6 天华北地区标准化的能见度的合成

负位相的 EU 遥相关活动周期大约有 13 天，选择经过了 500 hPa 等压面上的三个位势高度异常中心的直线，绘制 EU 遥相关负位相周期内的位势高度异常的垂直剖面(如图 10 所示)。Lag -6 天，欧洲地区存在位势高度正异常和负异常中心，这些异常随时间逐渐加强。在 lag -5 天时，90°E 开始出现正异常中

心, 在欧亚大陆上开始形成欧亚遥相关的正-负-正结构。在 lag 0 天时, 异常中心的异常达到最大, 三个中心最大异常分别为 120 gpm、-210 gpm 和 90 gpm。其中东侧的正异常中心在 lag -1 天左右逐渐影响到中国东北部地区, 并在随后的几天内在中国东北部地区滞留加强。

从图中也可以看出, 在 lag -1 天之前, 这些位势高度异常中心在垂直方向上呈现向东倾斜的特征, 表现为异常中心的斜压结构。在 lag -1 天时这些异常中心变为正压结构。分析表明, 斜压结构可能对异常中心向东移动起到重要作用, 但位势高度异常中心的维持和发展主要是由于正压力不稳定导致的 [18]。

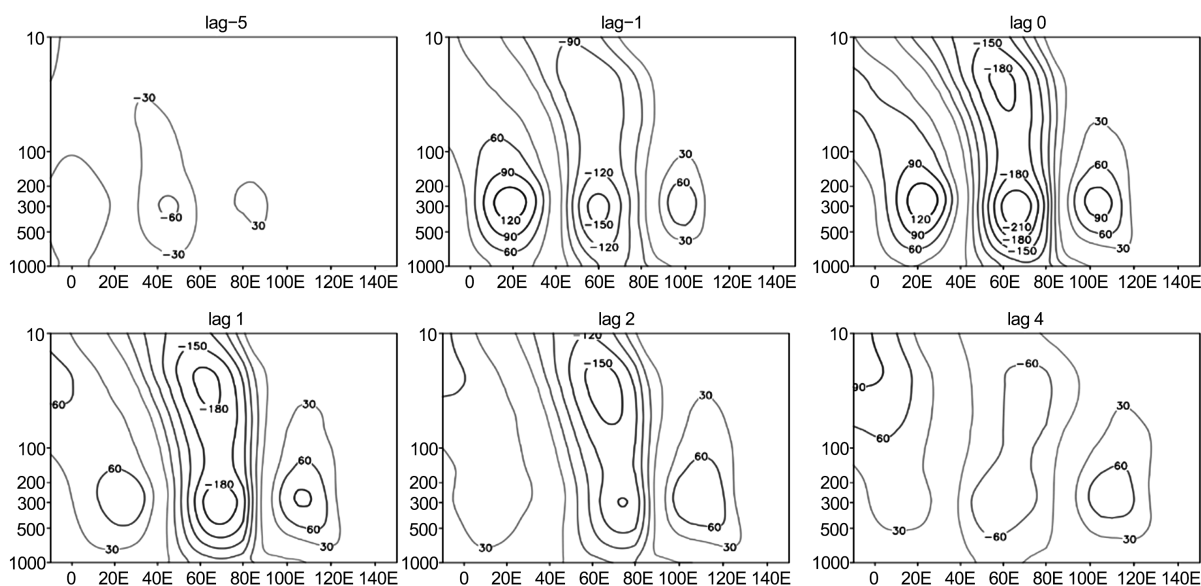


Figure 10. Vertical cross sections of the geopotential height anomaly during the negative phase activity cycle of EU teleconnection

图 10. EU 遥相关负位相活动周期内位势高度异常垂直剖面

4. 结论

中国北方地区是中国雾霾多发地区之一, 冬季雾霾日数存在显著的年际变化。利用地面站观察资料和大气再分析资料, 采用 SVD 分析、合成分析等多种方法, 研究了北半球中高纬环流与中国北方冬季雾霾日数的关系。同时, 根据 500 hPa 位势高度异常的空间异常分布, 重新定义了一个欧亚遥相关指数, 揭示了 500 hPa 位势高度异常通过遥相关影响中国雾霾的活动特征。

结果表明, 500 hPa 等压面上的欧亚遥相关是影响中国北方雾霾的重要形势。当欧亚遥相关处于正相位时, 西伯利亚地区位势高度增加, 东亚和欧洲地区位势高度减小, 有来源于新地岛的较强波作用通量将较强的冷空气从新地岛附近输送至华北地区; 同时, 近地面西伯利亚高压加强, 中国东侧位势高度减小, 利于北风的加强。冷空气的输送和北风的加强有利于雾霾的扩散, 雾霾日数减少。欧亚遥相关处于负位相时反之, 不利于雾霾的消散, 雾霾日数增加。

选取三个格点定义了一个新的欧亚遥相关指数, 三个格点分别为(10°E, 55°N)、(80°E, 60°N)和(120°E, 40°N)。该指数与雾霾日数相关系数为-0.5, 超过了 99%的置信水平, 其与雾霾日数关系更为密切。欧亚遥相关活动周期约为 13~15 天, 大约在欧亚遥相关指数达到峰值前 2 天开始对华北能见度产生影响, 持续时间约 5~6 天。斜压不稳定是 EU 遥相关向东发展的原因, 而正压不稳定在 EU 遥相关的发展和维持中起重要作用。

参考文献

- [1] 邱静怡, 盛立芳, 周扬, 等. 1980-2012 年夏季中国东部雾霾时空分布特征及增长原因初探[J]. 地球科学前沿, 2017, 7(6): 739-750.
- [2] 吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 1951-2005 年中国大陆霾的时空变化[J]. 气象学报, 2010, 68(5): 680-688.
- [3] Cao, Z., Sheng, L., Liu, Q., *et al.* (2015) Interannual Increase of Regional Haze-Fog in North China Plain in Summer by Intensified Easterly Winds and Orographic Forcing. *Atmospheric Environment*, **122**, 154-162. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.09.042>
- [4] Liu, Q., Sheng, L., Cao, Z., *et al.* (2017) Dual Effects of the Winter Monsoon on Haze-Fog Variations in Eastern China. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, **122**, 5857-5869. <https://doi.org/10.1002/2016JD026296>
- [5] Yang, Y., Liao, H. and Lou, S. (2016) Increase in Winter Haze Over Eastern China in Recent Decades: Roles of Variations in Meteorological Parameters and Anthropogenic Emissions. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, **121**, 13050-13065. <https://doi.org/10.1002/2016JD025136>
- [6] Li, Q., Zhang, R. and Wang, Y. (2016) Interannual Variation of the Wintertime Fog-Haze Days across Central and Eastern China and Its Relation with East Asian Winter Monsoon. *International Journal of Climatology*, **36**, 346-354. <https://doi.org/10.1002/joc.4350>
- [7] 周须文, 韩世茹, 张金龙, 等. 欧亚波列与京津冀雾霾的关系及形成机制[J]. 气候变化研究快报, 2017, 6(5): 352-361.
- [8] 赖芬芬, 马学款. 2014 年 1 月大气环流和天气分析[J]. 气象, 2014, 40(4): 515-520.
- [9] 赵桂香, 杜莉, 卫丽萍, 等. 一次持续性区域雾霾天气的综合分析[J]. 干旱区研究, 2011, 28(5): 871-878.
- [10] Wang, L., Chen, W., Zhou, W., *et al.* (2010) Effect of the Climate Shift around Mid 1970s on the Relationship between Wintertime Ural Blocking Circulation and East Asian Climate. *International Journal of Climatology*, **30**, 153-158. <https://doi.org/10.1002/joc.1876>
- [11] 杨双艳, 武炳义, 张人禾, 等. 冬季欧亚中高纬大气低频振荡的传播及其与欧亚遥相关型的关系[J]. 大气科学, 2014, 38(1): 121-132.
- [12] Wallace, J.M., Gutzler, D.S. (1981) Teleconnections in the Geopotential Height Field during the Northern Hemisphere Winter. *Monthly Weather Review*, **109**, 784-812. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2)
- [13] Sung, M., Lim, G., Kwon, W., *et al.* (2009) Short-Term Variation of Eurasian Pattern and Its Relation to Winter Weather over East Asia. *International Journal of Climatology*, **29**, 771-775. <https://doi.org/10.1002/joc.1774>
- [14] Han, S.Q., Hao, T.Y., Zhang, Y.F., *et al.* (2017) Vertical Observation and Analysis on Rapid Formation and Evolutionary Mechanisms of a Prolonged Haze Episode over Central-Eastern China. *Science of the Total Environment*, **616-617**, 135. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.278>
- [15] 周述学, 邓学良, 王传辉, 等. 华东 2018 年冬季一次典型雾霾过程的气象成因分析[J]. 高原气象, 2020, 39(5): 1110-1121.
- [16] Liao, H., Chang, W. and Yang, Y. (2015) Climatic Effects of Air Pollutants over China: A Review. *Advances in Atmospheric Sciences*, **32**, 115-139. <https://doi.org/10.1007/s00376-014-0013-x>
- [17] 符传博, 丹利. 重污染下我国中东部地区 1960-2010 年霾日数的时空变化特征[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(2): 219-226.
- [18] Wang, N. and Zhang, Y. (2015) Evolution of Eurasian Teleconnection Pattern and Its Relationship to Climate Anomalies in China. *Climate Dynamics*, **44**, 1017-1028. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2171-z>